地震時の液状化事例とせん断波速度の関係

CORRELATION BETWEEN SOIL LIQUEFACTION DURING EARTHQUAKE AND SHEAR WAVE VELOCITY

鈴木康嗣*, 時松孝次**

Yasutsugu SUZUKI and Kohji TOKIMATSU

The seismic CPT tests are conducted at 66 sites where soil liquefaction have or have not occurred during earthquakes. The correlations among the cyclic shear stress ratio, modified shear wave velocity V_{s1} , soil behavior type index I_c and the actual soil performance during earthquakes are examined. The critical V_{s1} -value causing liquefaction for sand is found to increase with I_c if $I_c < 1.9$, while it decreases if $I_c > 1.9$. Based on the above relation, the boundary line separating liquefiable from non-liquefiable conditions is presented in terms of V_{s1} and I_c , which is uniquely expressed regardless of the fines content.

Keywords : Shear wave velocity, Liquefaction resistance, Case history, Cone penetration test, Soil classification, Earthquake damage, Strong motion record

せん断波速度, 液状化強度, 事例検討, コーン貫入試験, 土質分類, 地震被害, 強震記録

1. はじめに

砂地盤の液状化強度を原位置試験から評価する手法として, 標準貫入試験(SPT)のN値が広く用いられている^{1), 2)}。標準貫入試験は, 簡易な装置で地盤の動的強度が得られることから, 液状化予測に適した試験法であるが, 細粒分を多く含む土や礫を含む土に対する適用性には限界がある。そこで, 標準貫入試験以外の原位置調査手法から液状化強度を評価する手法が幾つか提案されている^{3)~14)}。筆者らは, 細粒分を含むシルト質砂に適していると考えられるコーン貫入試験(CPT)に基づく液状化強度予測の可能性を既に報告している^{3), 4)}。一方, 礫を含む土に対しては, 標準貫入試験を大型化した大型貫入試験(LPT)⁵⁾や, せん断波速度(せん断弾性係数)^{6)~14)}が適していると考えられ, せん断波速度に関しては室内液状化試験^{6)~8)}や地震時の液状化事例^{9)~14)}との関係が示されている。

砂質土の液状化強度の評価法として現在最も信頼できる方法は, 原位置凍結サンプリング¹⁵⁾により採取した真に乱さない試料を用いて, 繰返し三軸試験等により液状化強度を求める手法である。時松ら^{6), 7)}は砂質土に関して凍結サンプリング試料の液状化強度とせん断弾性係数の関係について検討⁶⁾すると共に, 歪履歴を与えてせん断弾性係数を合わせることで, 室内調整試料に関してもせん断弾性係数で液状化強度を評価できることを示した⁷⁾。また, 畑中ら⁸⁾は礫を

含む土に関して凍結サンプリング試料の液状化強度とせん断波速度の関係を示した。しかし, 繰返し三軸試験から得られる液状化強度は, 原位置の応力状態や地震動の多方向性・不規則性の影響を考慮していないので, 実際の地震時における液状化の有無との対比¹⁶⁾が重要である。せん断波速度を用いた既往の手法でも, 実際の地震時における液状化の有無に基づいて液状化判定図表を作成している^{9)~14)}。Andrusら¹⁴⁾は, 26地震・70以上のサイトで行われたせん断波速度測定結果を収集し, 判定図表を作成しているが, 大地震時のデータが少ないため, 液状化強度が大きい場合や細粒分を多く含む場合には適用性に欠ける部分がある。

本研究では, 強震記録と液状化事例がそろっている地域においてサイスミックコーン貫入試験(SCPT)を実施⁴⁾し, 先端抵抗と周面摩擦抵抗を組合わせて土質分類を行い, せん断波速度と地震外力の比較を行った。その結果に基づき, SCPT試験のせん断波速度から液状化強度を予測する可能性を検討する。

2. サイスミックコーン貫入試験

2.1 試験の概要

表1に示す各地震において強震記録と液状化事例が揃っている66地点でサイスミックコーン貫入試験を実施した。表1では, 礫を含

* 鹿島技術研究所建築構造グループ 上席研究員・工修

** 東京工業大学大学院理工学研究科建築学専攻 教授・工博

Supervisory Research Eng., Building Structure Group, Kajima Technical Research Institute, Kajima Corp., M. Eng.

Prof., Dept. of Architecture and Building Engineering, Faculty of Eng., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

む土層が存在する地点（神戸市のポートアイランドと六甲アイランドの全地点、以後対象土を礫混じり土と呼称）と、存在しない地点（それ以外、以後砂質土と呼称）を区別している。

試験に用いたコーン貫入体（図1）は、先端抵抗、周面摩擦抵抗、間隙水圧を測定する一般的な3成分コーンに、せん断波を測定する速度計を組込んだサイスミックコーン¹⁷⁾である。SCPT試験は専用の調査車¹⁸⁾を用いて2 cm/sの一定速度でコーンを貫入しながら、2.5 cm間隔で上記3成分を測定した。また、50 cmまたは100 cm毎に貫入を一時停止し、調査車下部に設置されている板叩き装置¹⁸⁾により地表で発生させたせん断波を測定するとともに、途中の1深度で間隙水圧が消散して静水圧になるのを待って地下水位を測定した。

板叩き装置には機械的なハンマーを用いているので、立上がりりが明瞭で再現性が非常に良いせん断波を発生できる。そのため、人為的誤差を介さずに、相互相関関数を利用¹⁹⁾してコンピュータで自動的にせん断波の時間差を算出した。

2.2 試験結果と土質分類

SCPT試験結果の一例を図2に示す。図2には、先端抵抗 q_t 、周面摩擦抵抗 f_s 、間隙水圧 P_w 、後述する I_c 、せん断波測定波形、せん断波速度 V_s の深度分布と共に、液状化したと判断した深度の範囲と3章以降の検討に採用したデータの深度を示している。また、間隙水圧の深度分布中には、間隙水圧の消散測定から得られた静水圧 P_{w0} の深度分布を破線で併記した。せん断波の波形は立ち上がりりが明瞭なため、測定を行った50 cm間隔でせん断波速度を評価した。

SCPT試験では直接土を観察することが出来ない。Robertsonは、先端抵抗 q_t (kPa)と、周面摩擦抵抗 f_s (kPa)と先端抵抗 q_t の比である摩擦比 $R_f (= f_s / q_t)$ を上載圧で基準化した基準化先端抵抗 Q_t と基準化摩擦比 F_R を定義²⁰⁾し、両者から土質を一つの数値で分類するSoil Behaviour Type Index, I_c を提案²¹⁾して土質分類を行った。

$$Q_t = (q_t - \sigma_v) / \sigma_v' \quad (1)$$

$$F_R = f_s / (q_t - \sigma_v) \times 100 \quad (\%) \quad (2)$$

$$I_c = \{ (3.47 - \log Q_t)^2 + (1.22 + \log F_R)^2 \}^{0.5} \quad (3)$$

ここで、 σ_v は上載圧(kPa)、 σ_v' は有効上載圧(kPa)である。 I_c は、粘性土の先端抵抗が砂質土に比べて小さくなる性質や、粘性土は粘着力の影響で砂質土に比べて摩擦比が大きくなる性質を利用して土質分類を行う指標で、砂質土に比べて粘性土の方が大きな値と

なる。上記の関係は主に北米のデータに基づいて作成されたものであるが、堆積環境が異なる日本の土にも適用可能であることを筆者らが確認している²²⁾。また、筆者らは(3)式をさらに進め、 I_c から細粒分含有率FC(%)を推定するために次式を提案した²²⁾。

$$FC = I_c^{4.2} \quad (4)$$

図2には、(4)式から求めたFCに基づく柱状図を併記している。 I_c が2.05以下で砂、2.95以上で粘土、その中間をシルト系の土と判断し²²⁾、 $I_c = 2.54$ でFC=50%となる。

2.3 試験地点の強震記録と液状化の有無

SCPT試験は、文献4)に示した78地点で実施したが、一部の地点でせん断波速度を測定しなかったため、表1に示す66地点のデータを用いる。SCPT試験地点、液状化の有無、設定した最大水平加速度 α_{max} およびその設定に用いた強震記録は文献4)と同一であり、その一覧を表1に示す。最大水平加速度は、地表(一部建物内)における強震記録^{23)~37)}の水平2成分をベクトル合成した最大値、または推定された最大加速度値³⁸⁾とした。

釧路沖地震および北海道東方沖地震で液状化の被害が生じた釧路市内の液状化地点と非液状化地点を含む16地点でSCPT試験を実施した。釧路沖地震では釧路地方気象台^{23), 24)}と釧路港湾建設事務所²⁵⁾で、北海道東方沖地震では上記2地点^{24), 26), 27)}と共にESG研究会による多地点の強震記録²⁸⁾が得られている。そこで、ESG研究会による強震記録が得られている地点ではその記録を北海道東方沖地震の値とし、釧路市内ではSCPT試験を主に海岸付近で実施したことから、釧路港湾建設事務所における両地震の最大加速度の比(452/274 = 1.65)をESG研究会による観測値に乘じ、得られていない釧路沖地震の最大加速度を推定した。また、ESG研究会による強震記録が得られていない地点では、文献38)で推定している釧路沖地震における最大加速度を釧路沖地震の値とし、北海道東方沖地震は上記の比の逆数(1/1.65)を乗じた値とした。表1には両地震の最大値を併記している(括弧内に北海道東方沖地震)。

北海道南西沖地震では、函館市の6地点、上磯町の2地点、長万部町の7地点および森町の2地点でSCPT試験を実施し、函館港湾建設事務所²⁹⁾、JR長万部駅³⁰⁾およびJR森駅³⁰⁾で観測された強震記録を用いた。

兵庫県南部地震では、神戸市の24地点、西宮市の2地点および尼

図1 サイスミックコーンの概要

図2 SCPT試験結果の一例（釧路東港，KEP）

表 1 調査地点の液状化の有無と地震外力

Test Regions	Test Codes	Field Behavior ^{*1}	Thickness of Liq. Layer (m)	Depths of Adopted Data (m) Liq. / Boundary / No Liq.	Sand or Gravel	Ref. of CPT	Earthquakes	M	α_{max} (cm/s ²) ^{*2}	Reference of α_{max}
Kushiro City	KPC-A	●	3	3.1, 3.6//6.1 (/3.1, 3.6//6.1)	Sand (Soil without Gravel)		Kushiro-Oki (01/15/1993) (Hokkaido Toho-Oki) (10/04/1994)	7.8 (8.2)	452(274) ^{*2}	PHRI ³ Kushiro-G ²⁵ (Same ²⁷)
	KPC-B	●	4	3.0, 4.0, 6.6//7.6 (/3.0, 4.0, 6.6//7.6)						
	KFT	●	6	6.1, 9.6/12.6/ (6.1/9.6/12.6)						
	KEP	●	14(14)	5.7, 7.7//5.7, 7.7//						
	KMS	○	—	//10.5//10.5						
	ASS	△	—	/2.6, 3.1//2.6, 3.1/						
	KSS	△	—	/3.1, 4.6//3.1, 4.6/						
	KNP	△	—	/8.0/11.5//8.0, 11.5/						
	KIS	○	—	//2.6//2.6						
	KCH	△	—	/4.6//4.6						
	OSF	○	—	//3.1//3.1						
	KDB	○	—	//3.1//3.1						
	TSS	○	—	//3.6//3.6						
	KSP	○	—	//4.9//4.9						
	KTH	△	—	/9.4/14.8//9.4/14.8/						
	KAA	●	5(3)	7.1//13.1(7.1/13.1)						
	HPC	○	—	//2.1						
	HHS-A	●	7	1.6, 4.1//						
Hakodate City	HHS-B	△	—	/4.6/2.1, 8.2, 8.7, 12.2	Sand (Soil without Gravel)		Hokkaido Nansei-Oki (07/12/1993)	7.8	148	Average value of PHRI Hakodate-F and Hakodate-M ²⁹
	HNP-A	●	5	2.6, 4.1, 5.1//14.7, 15.2, 16.2, 16.7, 20.2						
	HNP-B	●	3	3.6//7.6, 19.3, 21.7						
	HNF	●	8	2.6, 4.6, 5.6//8.1, 9.1, 13.2						
	HTF	●	10	3.1, 4.1, 5.1//9.2, 13.8, 19.0						
	HSB	○	—	//5.1, 7.1, 8.1, 9.2, 11.2, 12.2, 13.2, 14.7, 19.3						
Oshamanbe Town	OSS	△	—	//11.1/4.6, 6.6, 7.6					298	RTRI ³ JR Oshamanbe Station ³⁰
	OTO	●	3	3.6/10.7, 12.2/8.2, 9.2						
	OTH	●	1	Non ^{*1} /10.3, 10.8/5.7, 8.2						
	OES	●	1	2.6//6.6, 7.6						
	OTG	○	—	//3.6, 4.1, 5.7, 6.7						
	OWC	△	—	/3.6, 4.6/2.6, 4.1						
	ONS	●	2	3.6, 4.1//						
	MWP-A	●	10	3.6//						
Mori Town	MWP-B	○	—	//2.6, 5.1					214	RTRI JR Mori Station ³⁰
	FUP	○	—	//5.8						
Kobe City	UES	○	—	//6.8	Sand (Soil without Gravel)		Hyogoken-Nambu (01/17/1995)	7.3	848	JMA ⁶ Kobe ³¹
	GOP	○	—	//6.8						
	NAP	○	—	//2.3, 6.3						
	TCF	●	8	5.1, 5.6, 7.1, 7.6, 8.1, 11.6//						
	TKF	●	11	5.6, 9.0, 11.0, 14.0//18.6						
	NKO-A	●	5	3.6, 5.6, 9.6//						
	NKO-B	●	4	5.1, 6.1, 6.6, 7.1//						
	KOP	●	4	3.3, 5.3//8.3, 13.3						
	NPP	●	6	3.1, 4.1, 5.1/11.1/8.1, 15.1						
	KMO	●	11	2.8, 4.8, 7.3//						
	MIP	●	3	4.3//4.8, 10.1						
	SHF	○	—	//4.3, 8.3, 15.8						
	SES	○	—	//2.8, 5.3						
	HCP	○	—	//4.3, 7.3, 12.3						
	YKF	○	—	//3.1						
	KPS	●	12	6.3//17.8						
	SDC	●	2	4.8, 6.8//						
	KHS	△	—	/7.8, 9.3, 13.3, 14.3/19.3						
	KES	△	—	/6.8/8.3						
	KWC	●	9	4.8, 6.8, 8.3, 9.8, 11.3//13.8, 19.3						
	MHS	●	4	2.8, 4.3, 8.8, 11.8, 14.3//						
	KAI	○	—	//4.1						
	NWC	●	2	3.8//						
Nishinomiya City	HAH	●	5	4.1, 4.6, 6.6//10.6	Sand (Soil without Gravel)				792	Osakagas Nishinomiya ³⁵
	IES	●	6	4.1, 4.6, 6.1, 7.1/12.8/10.8, 14.8						
Amagasaki City	SKF	●	6	6.1, 7.1/8.1, 11.1/12.8					473	PHRI Amagasaki-G ³³
	DMC	●	4	7.1, 7.6, 9.6//4.6, 12.6, 19.3						
Yonago City	YAH-A	●	3	3.8//7.8	Sand (Soil without Gravel)	46)	Tottoriken-Seibu (10/06/2000)	7.3	441	K-Net Yonago ³⁶
	YAH-B	●	8	2.1, 5.1, 8.1//						
Sakaiminato City	YTK	●	8	5.1//9.1		47)			305	PHRI Sakaiminato-G ³⁶
	YSA-A	●	10	3.8/6.8/						
	YSA-B	●	8	3.3/5.9/						

*1: ●: Liquefaction △: Boundary ○: No Liquefaction
 *3: Port and Harbour Research Institute
 *5: Railway Technical Research Institute

*2: () Hokkaido-Toho-Oki Earthquake
 *4: Japanese Working Group on Effects of Surface Geology on Seismic Motion
 *6: Japan Meteorological Agency
 *7: No Survey Data

崎市の2地点でSCPT試験を実施した。兵庫県南部地震では多数の強震記録が観測されているが、神戸海洋気象台³¹⁾、東神戸大橋³²⁾、神戸港工事事務所³³⁾、尼崎港工事事務所³³⁾、JR鷹取駅³⁴⁾、ポートアイランド³⁵⁾、関西電力尼崎第三発電所³⁵⁾、大阪ガスの葦合供給部³⁵⁾・西宮³⁵⁾で観測された強震記録を用いた。

鳥取県西部地震では、米子市の2地点と境港市の3地点でSCPT試験を実施し、K-net米子³⁶⁾および境港湾空港工事事務所³⁷⁾で観測された強震記録を用いた。

図2に示したようなSCPT試験結果と、筆者らによる地震後の観察(噴砂、地割れ、沈下等)^{39)~43)}や文献^{44), 45)}から、表1に示すように調

査地点の液状化の有無と液状化層厚などを判断した⁴⁾。噴砂や周辺建物との間に5cm程度以上の沈下が確認された地点を液状化地点、噴砂は確認されなかったが5cm程度以下の沈下や地割れが確認された地点を境界地点、いずれも確認できなかった地点を非液状化地点と判断した。また、液状化層や境界層の範囲は、地表の沈下量とコーン貫入試験結果から推定した。図2の例では、地表の沈下量は50～60cmであり、液状化による体積減少を3～5%と仮定すると液状化層厚は10～20mとなる。そこで、深度2.5～15.2m, 16.0～17.5mの範囲(層厚約14m)を液状化層と推定した。ただし、液状化層厚の推定誤差が大きいため、最も液状化の可能性が高いと推定される2深度のみを検討データに採用した。検討データは全てせん断波速度を測定した50cm区間(一部100cm区間)であり、その中心深度は表1に示すとおりである。

3. 地震外力とせん断波速度の比較

3.1 繰返しせん断応力比と換算せん断波速度の設定

地震時において地盤内に生じる繰返しせん断応力比 τ_d / σ_v' を次式^{1), 16)}で定義した。

$$\frac{\tau_d}{\sigma_v'} = r_n \frac{\alpha_{max}}{g} \frac{\sigma_v}{\sigma_v'} (1 - 0.015z) \quad (5)$$

ここで、 $r_n: 0.1(M-1)$, M : 地震のマグニチュード, α_{max} : 地表面最大加速度(cm/s^2), g : 重力加速度(cm/s^2), σ_v : 全上載圧(kPa), σ_v' : 有効上載圧(kPa), z : 地表からの深度(m)である。地表面最大加速度 α_{max} と地震のマグニチュード M は、表1に示した値を用いた。

せん断波速度 V_s は N 値と同様に有効上載圧 σ_v' の影響を受けるため、同じ液状化強度の土でも有効上載圧 σ_v' が大きくなるとせん断波速度 V_s が大きくなる。そこで、せん断波速度 V_s (m/s)から次式に従って有効上載圧 σ_v' (kPa)の影響を換算した換算せん断波速度 V_{s1} (m/s)を定義した。

$$V_{s1} = V_s / (\sigma_v' / 98)^n \quad (6)$$

ここで、 n は指数である。 n の値については0.25～0.375の提案もある^{7), 8)}が、砂質土に通常用いられている0.25を採用した。

3.2 換算せん断波速度、繰返しせん断応力比と I_c の関係

地震時に地盤内に生じる繰返しせん断応力比 τ_d / σ_v' と換算せん断波速度 V_{s1} の関係を、表1に示した砂質土(礫を含まない土, Sand)と礫混じり土(Gravel)を区別して図3に示す。液状化したと判断された黒塗のデータが左側に集中する傾向はあるものの、液状化・非液状化の境界線を引くことは難しい。これは、同じ換算せん断波速度 V_{s1} でも土の種類、すなわち細粒分含有率や平均粒径によって液状化強度が異なる影響を無視しているためと考えられる。

SCPT試験から土質分類を行う指標として、(3)式で定義される I_c がある。そこで、換算せん断波速度 V_{s1} と I_c の関係を、砂質土と礫混じり土を区別して図4に示す。液状化したと判断された黒塗のデータは、 I_c が2.5以下の領域に分布している。これは、 I_c がある一定値を越えると繰返しせん断応力比に関わらず液状化しない限界値が存在することを示している。すなわち、液状化が生じない粘性土と生じる砂質土の境界に対応している。しかし、筆者らが示した換算先

図3 繰返しせん断応力比と換算せん断波速度の関係

図4 換算せん断波速度と I_c の関係

端抵抗と I_c の関係⁴⁾のような明確な傾向は認められず、図4の関係から液状化・非液状化の境界を議論するのは難しいと考えられる。

そこで、図3、図4の関係をさらに詳しく吟味するため、筆者らが提案したせん断波速度と先端抵抗の相関関係、および先端抵抗を用いた液状化強度予測式を用いて、以後の議論を進める。

3.3 せん断波速度と先端抵抗の換算

筆者らは、サイスミックコーン貫入試験の先端抵抗 q_t (MPa)とせん断波速度 V_s (m/s)の関係を、 I_c を介して次式で定義した²²⁾。

$$V_s = (46.0I_c - 5.0) q_t^{0.4} \quad (7)$$

また、液状化・非液状化の境界線の換算先端抵抗 q_{t1} (MPa)を I_c で補正した補正先端抵抗 q_{ta} (MPa)を次式で定義した⁴⁾。

$$q_{ta} = q_{t1} \{1 + F(I_c)\} \quad (8)$$

$$q_{t1} = q_t / (98 / \sigma_v')^{0.65} \quad (9)$$

$$F(I_c) = (I_c - 1.55) / (2.60 - I_c) \quad (10)$$

$$= 0 \quad (1.55 < I_c \leq 2.50)$$

$$= 0 \quad (I_c \leq 1.55)$$

ここで、 σ_v' は有効上載圧(kPa)である。補正関数 $F(I_c)$ は、 I_c が2.6に近づくと急激に大きくなるが、 I_c が2.5以上で液状化事例がな

いので、(8)式は $I_c < 2.5$ の範囲で成り立つ関係としている。

(7)式の q_{li} に(8)式の q_{li} を代入することで、換算先端抵抗 q_{li} (MPa)による液状化・非液状化の境界線を、換算せん断波速度 V_{sl} (m/s)による境界線に変換することが出来る。すなわち、

$$V_{slcr} = (46.0I_c - 5.0) [q_{li} / \{1 + F(I_c)\}]^{0.4} \quad (11)$$

ここで、 V_{slcr} (m/s)は液状化・非液状化の境界線の換算せん断波速度(限界換算せん断波速度)である。

なお、換算先端抵抗は有効上載圧の0.65乗に依存する⁴⁾としているが、(7)式でせん断波速度に変換する場合、先端抵抗は0.4乗され、指数は $0.65 \times 0.4 = 0.26 \approx 0.25$ となり、換算せん断波速度が有効上載圧力の0.25乗に依存するとした(6)式の関係と矛盾しない。

3.4 I_c で分類した繰返しせん断応力比と換算せん断波速度の関係

限界換算せん断波速度 V_{slcr} と I_c の関係を検討するため、図3に示した繰返しせん断応力比 τ_d / σ_v' と換算せん断波速度 V_{sl} の関係を I_c が(a)1.55以下、(b)1.55~1.75、(c)1.75~2.00、(d)2.00~2.25、(e)2.25~2.60、(f)2.60以上に分けて図5に示す。図5には、(11)式により定義した液状化・非液状化の境界線を併記した。図5より、砂質土のデータ(図5中の●, △, ○)を I_c で分類すると、液状化・非液状化のデータが明瞭に別れ、 I_c が2.6以上で液状化したと判断されたデータ(●)は存在しない。また、液状化・非液状化の境界線(図5中の実線)は、 I_c が大きくなると右側へ移動するが、 I_c が1.9を境にして逆に左側へ移動し、 I_c が2.6以上では縦軸と一致している。以上の関係より、砂質土に関しては、液状化・非液

状化の事例データと境界線は概ね矛盾していないと判断される。しかし、礫混じり土の液状化データ(図5中の■)は、全体的に境界線付近に分布し、実線で示した境界線と整合していない。

3.5 繰返しせん断応力比で分類した換算せん断波速度と I_c の関係

図5より、液状化・非液状化の境界線の換算せん断波速度 V_{slcr} は、 I_c が1.9を境にして増減することが分かった。そこで、この関係をさらに詳細に検討するため、図4に示した換算せん断波速度 V_{sl} と I_c の関係を繰返しせん断応力比 τ_d / σ_v' が(a)0.15以下、(b)0.15~0.20、(c)0.20~0.30、(d)0.30~0.40、(e)0.40~0.50、(f)0.50以上に分けて図6に示す。図6には、(11)式により定義した液状化・非液状化の境界線を基に作成した換算せん断波速度 V_{sl} と I_c の関係における境界線(繰返しせん断応力比一定線)を併記した。図6より、砂質土のデータ(図6中の●, △, ○)を繰返しせん断応力比で分類すると、液状化・非液状化のデータが比較的明瞭に別れることが分かる。液状化・非液状化の境界線(図6中の実線)は、 I_c が1.9付近で最大値をとり、 I_c が2.5程度を超えると換算せん断波速度が急激に小さくなり、 I_c が2.6でゼロとなる。砂質土に関しては、液状化・非液状化の事例データと(11)式から得られる境界線は概ね矛盾しないと判断される。しかし、図5と同様に礫混じり土の液状化データ(図6中の■)は全体的に境界線付近に分布し、境界線と整合していない。

以上の結果より、砂質土の液状化・非液状化の境界線は、(11)式で定義すれば良いと判断される。しかし、礫混じり土に関してはさらに検討が必要と考えられる。

図5. I_c で分けた繰返しせん断応力比と換算せん断波速度の関係

図6 繰返しせん断応力比で分けたと換算せん断波速度と I_c の関係

4. せん断波速度による液状化強度予測

4.1 砂質土の限界換算せん断波速度

(11)式で定義した限界換算せん断波速度を、換算せん断波速度と I_c の関係に表示して図7に、繰返しせん断応力比と換算せん断波速度の関係に表示して図8に示す。図7の横軸には、(4)式によって I_c から換算した細粒分含有率FC(%)の軸を併記した。限界換算せん断波速度 V_{s1cr} は、(11)式に示したように I_c が増えると大きくなる項 $(46.0I_c - 5.0)$ と、小さくなる項 $[q_{us}/(1 + F(I_c))]^{0.4}$ の積で表さ

れているため、 I_c が1.9付近で最大値を示す関係となっている。 $I_c = 1.9$ は(4)式よりFC=15(%)に相当する。一般的には、細粒分含有率が増える程(I_c が増える程)、液状化強度が増加して限界換算せん断波速度 V_{s1cr} が小さくなると考えられている。従って、FCが10%程度以下の砂の V_{s1cr} が小さくなる傾向は、既往の知見^{7),13),14)}と異なっている。砂に人工的に細粒分を混ぜた試料の液状化強度^{48),49)}や、原位置から採取した細粒分含有率の異なる砂試料の液状化強度⁵⁰⁾は、細粒分の増加とともに様に増加するのではなく、一度低下してから増加する傾向が認められ、液状化強度が最小となる細粒分含有率FCは10~30%程度である^{48)~50)}。これは、細粒分が増すと砂粒子同士の噛合

図7 繰返しせん断応力比による限界換算せん断波速度の関係

図8 I_c による限界換算せん断波速度の関係

いが薄れて液状化強度が一旦低下するが、さらに細粒分が増すと細粒分粒子同士の噛合いや粘着力の影響で液状化強度が増加すると解釈されている^{(48), (49)}。限界換算せん断波速度 V_{slcr} が最大となる $I_c=1.9$ (FC=15%)は、液状化強度が最小となる上記範囲に含まれることから、換算せん断波速度で評価した液状化強度に、上記現象が顕著に現れているものと推測される。

設計では、せん断波速度とともにせん断弾性係数を用いる。そこで、次式から換算せん断弾性係数 G_{01} (MPa)を算出した。

$$G_{01} = G_0 / (98 / \sigma_v')^{0.5} = \rho_t \cdot V_{s1}^2 \quad (12)$$

ここで、 G_0 は初期せん断弾性係数 (MPa)である。湿潤密度 $\rho_t=1.8$ (g/cm³)を仮定し、図7の横軸を換算せん断弾性係数 G_{01} に変換した関係を図9に示す。換算せん断弾性係数は、 I_c の変化に対して敏感に値を変えるとともに、換算せん断弾性係数の増減に対して繰返しせん断応力比が比較的緩やかに増減する関係となる。

4.2 補正せん断波速度

I_c が1.9付近で限界換算せん断波速度が最大値を示すことから、 $I_c=1.9$ を基準として換算せん断波速度を補正する。 I_c が2.6以下のデータに対し、換算せん断波速度 V_{s1} (m/s)を I_c に応じて補正した補正せん断波速度 V_{sa} (m/s)を次式で定義した。

$$V_{sa} = V_{s1} \cdot (V_{slcr(I_c=1.9)} / V_{slcr(I_c)}) \quad (13)$$

ここで、 $V_{slcr(I_c=1.9)}$ (m/s)は $I_c=1.9$ の限界換算せん断波速度、 $V_{slcr(I_c)}$ (m/s)はそのデータの I_c に基づく限界換算せん断波速度である。

地震時に地盤内に生じる繰返しせん断応力比 τ_d / σ_v' と(13)式により補正した補正せん断波速度 V_{sa} の関係を砂質土に関して図10に、礫混じり土に関して図11に示す。図10、図11には $I_c=1.9$ における砂質土の限界換算せん断波速度を実線で併記した。(13)式で定義した補正せん断波速度 V_{sa} を用いることで、砂質土に関しては I_c によらず、液状化・非液状化の境界を明瞭に示すことが出来る。一方、礫混じり土に関しては境界線が右側にずれる傾向が認められる。この原因として、粒径の大きな礫混じり土ではせん断波が大きな礫を伝わるため、土のせん断弾性係数に連動したせん断波速度よりも速くなることが考えられる⁽⁵¹⁾。ポートアイランドで行われた凍結サンプル

図9 繰返しせん断応力比と換算せん断弾性係数の関係

図10 繰返しせん断応力比と補正せん断波速度の関係 (砂質土)

図11 繰返しせん断応力比と補正せん断波速度の関係 (礫混じり土)

リング試料 (表1に示したKWC地点近傍で実施) の最大粒径は37.5～101.6mmであり⁽⁵²⁾、文献(51)から推定されるせん断波速度は砂質土の1.1～1.3倍程度大きくなるので、砂質土の境界線の1.1～1.3倍の範囲を図11に破線で併記した。礫混じり土の液状化・非液状化の境界は、破線と概ね矛盾しないと判断されることから、礫混じり土ではさらに補正が必要であると考えられる。ただし、図11に示したように、礫混じり土のデータが砂質土のデータに比べて少なく、礫混じり土の液状化データ(■)と非液状化データ(□)の間が離れているため、本論文のデータで礫混じり土の境界線を検討するのは難しい。

なお、(13)式で定義される補正せん断波速度 V_{sa} は、SCPT試験のせん断波速度、先端抵抗および周面摩擦抵抗のみから得られ、物理試験結果をまったく必要としない。従って、SCPT試験のみで液状化強度が推定できることになる。また、SCPT試験を行えば、先端抵抗とせん断波速度の両者で同時に、ある程度の精度で液状化強度予測が出来ることになり、非常に有用であると考えられる。

5. まとめ

強震記録と液状化事例がそろっている地域でサイスミックコーン貫入試験を実施した。地震時の繰返しせん断応力比と、サイスミックコーン貫入試験のせん断波速度および I_c の関係を整理し、以下の知見を得た。

- a) 地震時の繰返しせん断応力比と換算せん断波速度の関係を I_L で分類すると、砂質土の液状化・非液状化の境界が明瞭に示される。また、 I_L が2.6以上では液状化事例が存在しない。
- b) 液状化・非液状化の境界線は、 I_L が増えると右側へ移動するが、 I_L が1.9付近を境にして逆に左側へ移動する。
- c) I_L に基づき補正した補正せん断波速度 V_{s0} を提案した。補正せん断波速度を用いると、砂質土の液状化・非液状化の境界が明瞭に示される。
- d) 礫混じり土に関しては、補正せん断波速度 V_{s0} をさらに補正する必要性が指摘できる。
- e) サイスマックコーン貫入試験では、先端抵抗とせん断波速度の両者で同時に、ある程度の精度で液状化強度を予測できる。すなわち、2手法でクロスチェックが可能である。

最後に、試験のために敷地を提供いただいた関係機関に謝意を表します。また、気象庁、運輸省港湾技術研究所（現独立行政法人港湾空港技術研究所）、建設省（現独立行政法人）建築研究所・土木研究所、科学技術庁（現文部科学省）防災科学技術研究所、神戸市、ESG研究会、鉄道総合技術研究所、関西電力㈱、大阪ガス㈱が観測した強震記録のデジタルデータを利用しました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，2001
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，2002
- 3) 鈴木康嗣，時松孝次：コーン貫入試験結果と凍結サンプリング試料の液状化強度の関係，日本建築学会構造系論文集，第566号，pp.81-88，2003.4
- 4) 鈴木康嗣，時松孝次，古山田耕司：地震時の液状化事例とコーン貫入試験結果の関係，日本建築学会構造系論文集，第571号，pp.95-102，2003.9
- 5) Suzuki, Y., Goto, S., Hatanaka, M. and Tokimatsu, K.: Correlation between strengths and penetration resistances for gravelly soils, *Soils and Foundations*, Vol.33, No.1, pp.92-101, 1993.3
- 6) Tokimatsu, K., Yamazaki, T. and Yoshimi, Y.: Soil liquefaction evaluations by elastic shear moduli, *Soils and Foundations*, Vol.26, No.1, pp.25-35, 1986.3
- 7) Tokimatsu, K. and Uchida, A.: Correlation between liquefaction resistance and shear wave velocity, *Soils and Foundations*, Vol.30, No.2, pp.33-42, 1990.6
- 8) Hatanaka, M., Uchida, A. and Suzuki, Y.: Correlation between undrained cyclic shear strength and shear wave velocity for gravelly soils, *Soils and Foundations*, Vol.37, No.4, pp.85-92, 1997.12
- 9) Stokoe, K. H. II, Roesset, J. M., Bierschwaile, J. G. and Aouad, M.: Liquefaction potential of sands from shear wave velocity, *Proceedings of 9th World Conference on Earthquake Engineering*, Vol.III, pp.213-218, 1988
- 10) Robertson, P. K., Woeller, D. J. and Finn, W. D. L.: Seismic cone penetration test for evaluating liquefaction potential under cyclic loading, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.29, No.4, pp.686-695, 1992.8
- 11) Kayen, R. E., Mitchell, J. K., Seed, R. B., Lodge, A., Nishio, S. and Coutinho, R.: Evaluation of SPT-, CPT-, and shear wave-based methods for liquefaction potential assessment using Loma Prieta data, *Proc., 4th Japan-U.S. Workshop on Earthquake Resistant Des. of Lifeline Fac. and Countermeasures for Soil Liquefaction*, Tech. Rep. NCEER-92-0019, M. Hamada and T. D. O'Rourke, eds., Vol.1, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, pp.177-204, 1992
- 12) Lodge, A. L.: Shear wave velocity measurements for subsurface characterization, Ph.D. dissertation, University of California, Berkeley, Calif, 1994
- 13) Andrus, R. D. and Stokoe, K. H. II: Liquefaction resistance based on shear wave velocity, *Proceeding of NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils*, Tech. Rep. NCEER-97-0022, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, pp.89-128, 1997
- 14) Andrus, R. D. and Stokoe, K. H. II: Liquefaction resistance of soils from shear-wave velocity, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.126, No.11, pp. 1015-1025, 2000.11
- 15) 時松孝次，大原淳良：講座「地盤の熱的問題」8.2凍結サンプリング，土と基礎，Vol.38, No.11, pp.61-68, 1990.11
- 16) Tokimatsu, K. and Yoshimi, Y.: Empirical correlation of soil liquefaction based on SPT N-value and fines content, *Soils and Foundations*, Vol.23, No.4, pp.56-74, 1983.12
- 17) Robertson, P. K., Campanella, R. G., Gillespie, D. and Rice, A.: Seismic CPT to measure in situ shear wave velocity, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.112, No.8, pp. 791-803, 1986.8
- 18) 鈴木康嗣，笹尾光，西謙治，武居幸次郎：サイスマックコーンとロータリーパーカッションドリルを併用した地盤調査システム，日本建築学会技術報告

- 集，第1号，pp.180-185，1995.12
- 19) 武藤清，太田外気晴，原昭夫，丹羽正徳：相互相関関数によるS波速度の測定・解析，*鹿島建設技術研究所年報*，第20号，pp.331-335，1972
- 20) Robertson, P. K.: Soil classification using the cone penetration test, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.27, No.1, pp.151-158, 1990.2
- 21) Robertson, P. K. and Fear, C. E.: Liquefaction of sands and its evaluation, *Proceedings of the First International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, IS-TOKYO '95, Vol.3, pp.1253-1289, 1995
- 22) 鈴木康嗣，時松孝次，實松俊明：コーン貫入試験結果と標準貫入試験から得られた地盤特性との関係，*日本建築学会構造系論文集*，第566号，pp.73-80，2003.4
- 23) 科学技術庁防災科学技術研究所：強震速報No.41 1993年1月15日 平成5年（1993年）釧路沖地震，1993.2
- 24) 石田寛，佐々木透，丹羽正徳，北川良和，鹿嶋俊英：釧路地方気象台の鉛直アレー地震観測記録に見られる表層地盤の増幅特性，*日本建築学会構造系論文集*，第490号，pp.91-100，1996.12
- 25) 松永康男，桜井博孝，森田年一，井合進：1993年釧路沖地震の港湾地域における強震記録，*港湾技研資料*，No.777，1994.6
- 26) 科学技術庁防災科学技術研究所：強震速報No.44 1994年8月31日 国後島付近の地震，1994年10月4日 平成6年（1994年）北海道東方沖地震，1994.12
- 27) 佐藤幸博，宮田正史，一井康二，森田年一，井合進：1994年北海道東方沖地震の港湾地域における強震記録，*港湾技研資料*，No.853，1996.12
- 28) Japanese Working Group on Effects of Surface Geology on Seismic Motion: Strong motion database, cooperative strong motion observation in Kushiro, Hokkaido, Japan, Association for Earthquake Disaster Prevention, 1997.6
- 29) 松永康男，桜井博孝，森田年一，井合進：1993年北海道南西沖地震の港湾地域における強震記録，*港湾技研資料*，No.778，1994.6
- 30) Nakamura, Y., Tomita, K., Tamogami, M., Hidaka, K., Saito, J. and Sato, S.: Strong acceleration and damage of 1993 Hokkaido Nansei-Oki Earthquake (quick report), *JR Earthquake Information No.19b*, Railway Technical Research Institute, 1993.6
- 31) 科学技術庁防災科学技術研究所：強震速報No.46 1995年1月17日 平成7年（1995年）兵庫県南部地震，1995.2
- 32) 建設省土木研究所：土木構造物における加速度強震記録（No.21），土木研究所彙報，第64号，1995.6
- 33) 佐藤幸博，一井康二，星野裕子，佐藤陽子，宮田正史，森田年一，井合進：1995年兵庫県南部地震の港湾地域における強震記録，*港湾技研資料*，No.907，1998.6
- 34) 中村豊，上半文昭，井上英司：1995年兵庫県南部地震の地震動記録波形と分析（II），*J R地震情報*，No.23d，1996.3
- 35) 日本建築学会兵庫県南部地震特別研究委員会特定研究課題1-SWG1，日本建築学会近畿支部耐震構造研究部会：1995年兵庫県南部地震強震記録資料集，日本建築学会，1996.1
- 36) <http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/>
- 37) 野津厚，深澤清尊，佐藤陽子，玉井伸昌，菅野高弘：港湾地域強震観測年報（1999&2000），*港湾空港技術研究所資料*，No.1026，2002.3
- 38) 飛田潤，杉村義広：釧路地方気象台および釧路市内の地震動特性における表層地盤の影響，1993年釧路沖地震に関する総合シンポジウム，日本建築学会地震災害委員会，pp.59-64，1994
- 39) 鹿島：1993年1月15日釧路沖地震被害調査報告書，1993.2
- 40) 鹿島：平成5年北海道南西沖地震被害調査報告書，1993.8
- 41) Tokimatsu, K., Suzuki, Y. and Tamura, S.: Preliminary report on geotechnical aspects of Hokkaido-Nansei-Oki Earthquake of July 12, 1993, *Performance of Ground and Soil Structures during Earthquakes, Special Volume for the 13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp.75-86, 1994.1
- 42) 鹿島：平成6年北海道東方沖地震被害調査報告書，1994.11
- 43) 鹿島：平成7年兵庫県南部地震被害調査報告書（第一報），1995.2
- 44) 濱田政則，磯山龍二，若松加寿江：1995年兵庫県南部地震液状化，地盤変位及び地盤条件，地震予知総合研究振興会，1995
- 45) 平成12年鳥取県西部地震災害緊急調査団：平成12年鳥取県西部地震災害緊急調査団報告，地盤工学会・調査部，2000.12
- 46) 大保直人，鈴木康嗣：鳥取県西部地震で液状化した安倍彦名団地の地盤評価，第37回地盤工学研究発表会，pp.1953-1954，2002
- 47) 稲垣太浩，福島勇治，大保直人，清田芳治，鈴木康嗣：境水道大橋で観測された鳥取県西部地震記録の分析（その2）地盤の評価，土木学会第57回年次学術講演会，Vol. I，pp.1739-1740，2002
- 48) 黄大振，柳沢栄司，菅野高弘：シルトを含む砂のせん断特性について，土木学会論文集，No.463/III-22，pp.25-33，1993.3
- 49) 桑野二郎，中澤博志，杉原弘一，矢部浩史：細粒分を含む砂の非排水繰返しせん断強度，第31回地盤工学研究発表会講演集，pp.993-994，1996
- 50) 伊藤周作，兵動正幸：不攪乱土の物理特性と液状化強度の関係について，第33回地盤工学研究発表会講演集，pp.89-90，1998
- 51) Tanaka, Y., Kokusho, T., Okamoto, T. and Kudo, K.: Evaluation of initial shear modulus of gravelly soil by laboratory test and PS-logging, *Proceedings of the First International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, IS-TOKYO '95, Vol.1, pp.101-106, 1995
- 52) Hatanaka, M., Uchida, A. and Ohara, J.: Liquefaction characteristics of a gravelly fill liquefied during the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake, *Soils and Foundations*, Vol.37, No.3, pp.107-115, 1997.9

（2003年7月10日原稿受理，2004年1月19日採用決定）